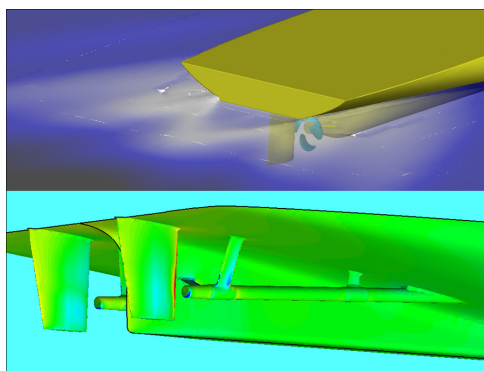


最新 CFD 技術の省エネ船型開発への活用

Application of Advanced CFD Technology to Energy-Saving Hull form Development



西垣 亮*¹
Makoto Nishigaki

川淵 信*²
Makoto Kawabuchi

石川 暁*³
Satoru Ishikawa

CFD 技術の進展により、船型開発における多くの問題に CFD で対応できるようになってきた。当社では、複雑形状の船体や付加物に対する自由表面を考慮した造波計算や、プロペラを考慮した自航計算に高精度、高速かつロバストに対応できる最新の CFD 技術を活用し、船体抵抗や推進効率を評価するとともに、船体を作る波の状況や船体周りの流れの状況などの情報を活用し、船型や付加物形状の改良案を抽出している。今後もこれらの技術を活用し、船舶の省エネ性能の更なる向上を図っていく。

1. はじめに

CFD 技術の進展には目覚ましいものがあるが、省エネ性能に優れた船型開発に有効活用していくためには、改良案の抽出に必要な推定精度を有することに加え、特に実船の複雑形状の性能評価が可能となるよう、短時間で格子作成できること、自由表面を含む解析にロバストに対応できること、大規模格子・多数の計算に高速に対応できることも重要な要素となってくる。当社では、これらを実現する最新の CFD ソフト及び大規模並列計算機を用いて、造波及び自航の計算を実施し、省エネ性能に優れた船型開発を推進しており、本稿にて事例とともに紹介する。

2. 計算法

2.1 造波計算

船尾端付近の形状の選択は、船尾造波特性、ひいては船の推進性能に与える影響が大きく、その形状最適化は省エネ船型の開発に必須であるが、従来の、構造格子及び移動格子による自由表面流れの CFD 計算法(水面の変化に伴って格子を変形させる方法)では、格子作成に要するノウハウ・時間や、計算のロバスト性の面で限界があり、船尾端形状の実設計において CFD は十分活用できていなかった。そこで、当社では、よりロバストな計算法の確立をめざし非構造格子及び界面捕獲法(固定格子で、密度関数により自由表面を解析する方法)への移行を進めてきた。このうち、格子については、非構造のヘキサ(六面体)格子の技術が進展し、複雑形状に対し、短時間で品質の良い格子を作成できるめどが立った。また、界面捕獲法についても、汎用 CFD コードの技術が進展し、ロバスト、かつ高精度の波高分布取得にめどが立った。

格子数については、従来は、計算機能力の限界から、船体から離れたところの格子は粗くし、船体近傍のみ格子を細分化して、主に船側波形を評価指標として、船首を中心とする縦波(八字波)による造波抵抗の低減を図ってきた。しかしながら、より高精度の計算を行うためには、格

*1 技術統括本部長崎研究所 主席研究員
*3 技術統括本部長崎研究所 主幹研究員

*2 技術統括本部長崎研究所

子の細分化範囲を広げることが望ましく、特に船尾形状の検討では、船体後方の横波状況も重要となってくるため、船体後方においても自由表面付近の格子細分化範囲を大幅に拡大した。また、非構造格子の生成にはオートメシヤを使うので、構造格子のように、比較する2船型間で、対応する箇所の格子数などが完全には固定されない。そこで、計算結果に対する格子影響を回避するため、構造格子の場合よりも格子分割数をより多くする必要がある。

これらを考慮し、格子数は、従来法の数十万レベルから、数百万～1千万レベルに増加させた。表1は従来CFDと最新CFDの計算手法の比較、図1は船尾付近の計算格子の比較例、図2は、計算結果の比較例である。最新CFDでは船尾形状を忠実に考慮するとともに、格子数を大幅に増加させ、広範囲の造波状況をとらえられていることが分かる。図3は、最新CFDによる波高分布の計算結果の実験との比較例で、縦波、横波の位置及び波高が実験とCFDではほぼ一致している。図4は船尾付近の局所的な造波状況を写真と比較して示したもので、船尾端の側端部での造波の形状が、CFDと実験で一致している。

表1 従来CFDと最新CFDの手法の比較

	従来CFD	最新CFD
船尾形状の取扱方法	計算安定性確保のため変更・簡略化	複雑形状を忠実に考慮
格子タイプ	構造格子	非構造ヘキサ格子
造波計算における自由表面取扱法	移動格子による方法 ¹⁾	界面捕獲法 ²⁾ (VOF ³⁾)
格子数	数十万	数百万～1千万
自航計算におけるプロペラモデル	UQCM ⁴⁾ によるボディーフォースモデル	UQCM ⁴⁾ によるボディーフォースモデル
乱流モデル	SR222 修正 Baldwin Lomax model (0方程式)	SST k- ω (2方程式)
並列計算CPU数	1	16～64

- 1) 自由表面の変形に応じて格子を変形させる方法
- 2) 界面捕獲法：固定格子で、密度関数により自由表面を解析する方法
- 3) VOF: Volume of Fluid 4) UQCM: Unsteady Quasi-Continuous Method

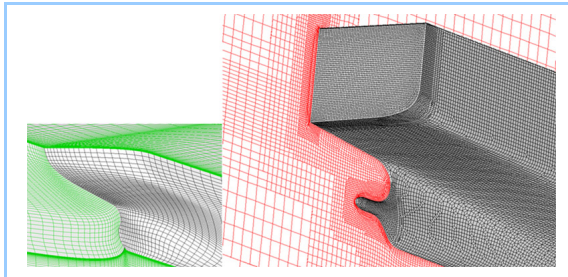


図1 従来CFD(左)と最新CFD(右)の造波計算格子の比較(RoRo船)

従来CFDは構造格子を用い、計算の安定性確保のため、トランサムを延長し、スタンチューブを丸めていたが、最新CFDは非構造のヘキサ(六面体)格子を用い、船尾形状を忠実に考慮するとともに、格子数を大幅に増加させている。

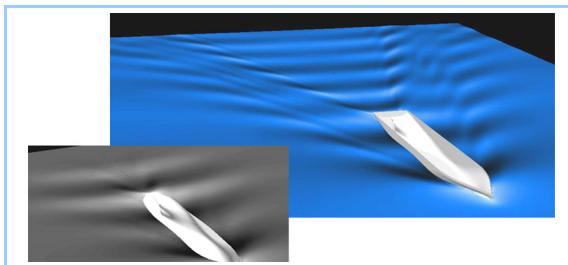


図2 従来CFD(左)と最新CFD(右)の造波計算結果の比較(KRISOコンテナ船)

最新CFDでは、船首及び船尾から斜め後方に波が伸びる様子を広範囲でとらえられている。

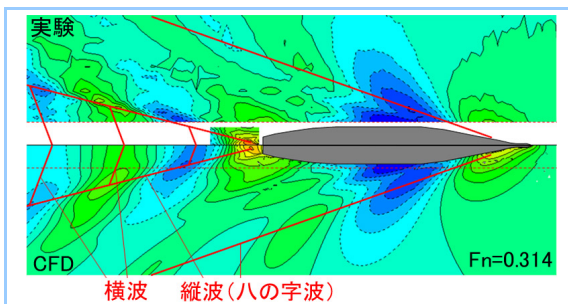


図3 波高分布の実験とCFDとの比較(フェリー)

波高コンターは、赤が高く青が低いことを示す。縦波(八の字波)、横波の位置及び波高が、実験とCFDではほぼ一致していることを示す。

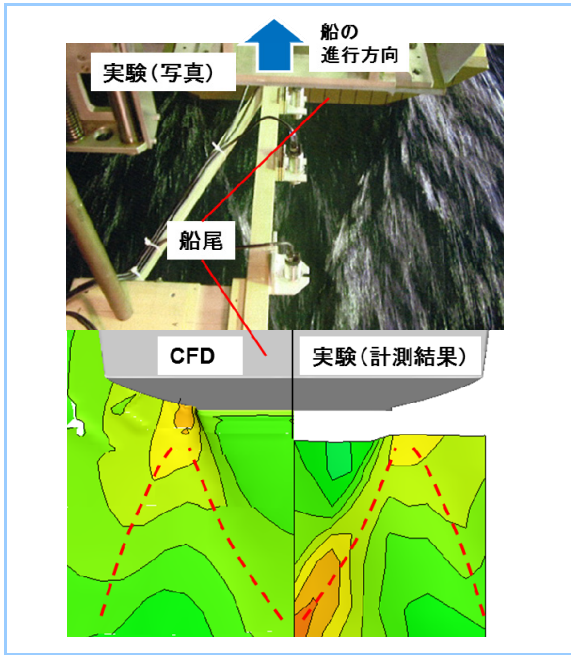


図4 船尾付近の造波状況の実験写真との比較(フェリー)

フェリーの船尾後方の局所的な波の状況について、CFD(左下)と、模型試験(上:写真, 右下:計測結果)の比較を示す。

船尾端側端部から後方に造られる波の形状が、CFD と実験で一致しており(下図赤点線)、実験写真でもこの部分が白っぽく見えている。

2.2 自航計算

当社では、従来 CFD にプロペラ計算法 UQCM (Unsteady Quasi-Continuous Method) をボディーフォースプロペラモデルとして組み込んでプロペラ吸い込み流れの影響を評価してきた⁽¹⁾が、これと同じ手法を汎用 CFD コードに組み込んで自航計算を実施している。

なお、この自航計算は、現状では、計算の安定性と計算時間の問題から、自由表面を考慮しない(上下対称の)条件で計算を実施している。従って、計算格子は、造波計算とは異なる格子としている。ただし、造波計算と同様に、非構造のヘキサ格子を使用し、プロペラ前後の複雑形状を忠実に考慮している。また、このプロペラ前後の空間領域には、発達した境界層流れが流入するため、この部分を従来格子よりも細分化することで、高精度化を図っている。格子数は数百万レベルと、従来より1桁大きくし、汎用コードによる並列計算で対応している。

上記自航計算法による、自航要素(推力減少率 t 及び伴流係数 w_m)の推定精度を図5に示す。CFD で求めた w_m が水槽実験に対し全体的に低い値を示すなど、推定精度には課題が残っており、現状は、常に実験結果と比較しながら自航性能を推定している。引き続き手法のブラッシュアップを進めながら、自航性能の優れた船尾形状の改良に活用していく。

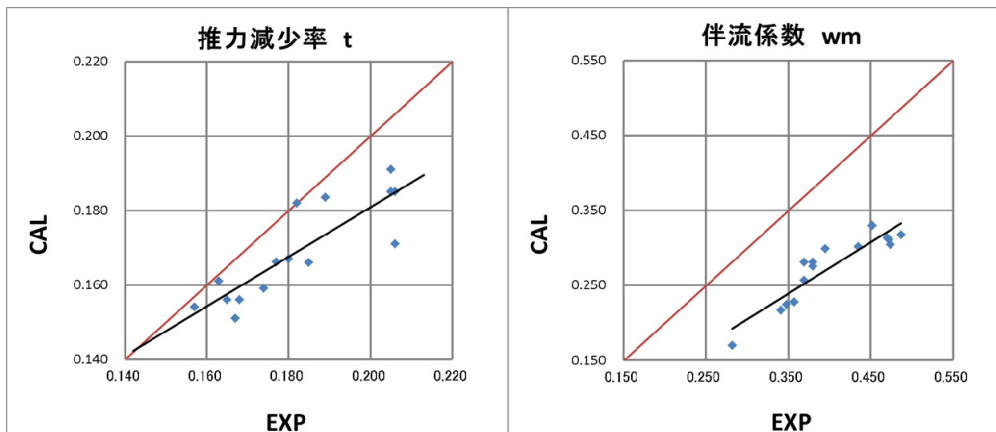


図5 ボディーフォースプロペラモデルを用いた自航計算の推定精度

自航要素である推力減少率 t 、及び伴流係数 w_m が、実験と CFD で良い相関を示している。

w_m が実験より小さめに評価されるなど、課題は残るが、常に実験結果と比較しながら推定している。

3. 計算事例

上記計算手法を用いて省エネ船型開発を行っていくには、船体周りの流れの分析が重要である。本章では、これまでの CFD 計算法では評価が難しかった、船尾波高の評価による船尾端形状の改良検討、ツインスケグ船型の流場の評価、シャフトブラケット後方のプロペラ面流場の評価の3つの事例で、流れの評価精度について説明する。

3.1 船尾波高の評価

図6は、高速船の船尾形状改良前後の船型に対する CFD による波高分布のコンター図(等高線図)である。船型改良により、船尾端直後及びその後方で波高の低減が見られる。図7は、この2船型に対する実験及び CFD の剰余抵抗の比較であり、船型改良により剰余抵抗の低減が得られていることを、CFD でも精度良く評価できていることが分かる。

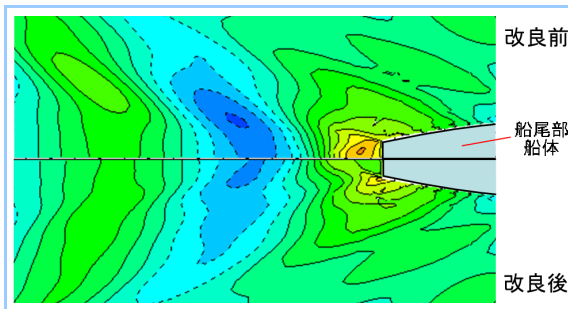


図6 CFD による船尾形状の改良前後の船尾波高の比較(フェリー)

船尾形状の改良により、船尾後方の波高が低減できていることを示す。

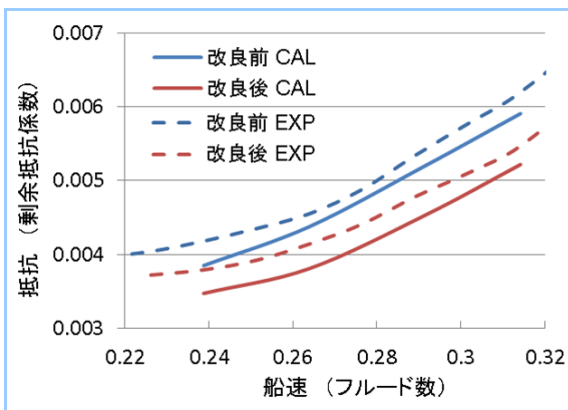


図7 船尾端形状の変更による抵抗低減例 (フェリー)

船尾端形状の改良により、広い速度範囲にわたって抵抗低減が得られていることを、CFD でもとらえられていることを示す。

3.2 ツインスケグ船型の流場の評価

図8に示すようなツインスケグ船型の開発においては、スケグの内・外側の流場の非対称性の評価が重要となる。同図に、ペイント試験と CFD によるスケグ内側面の流線の比較も示すが、共に流れの剥離が起こっており、剥離線の位置、形状は近いものとなっている。

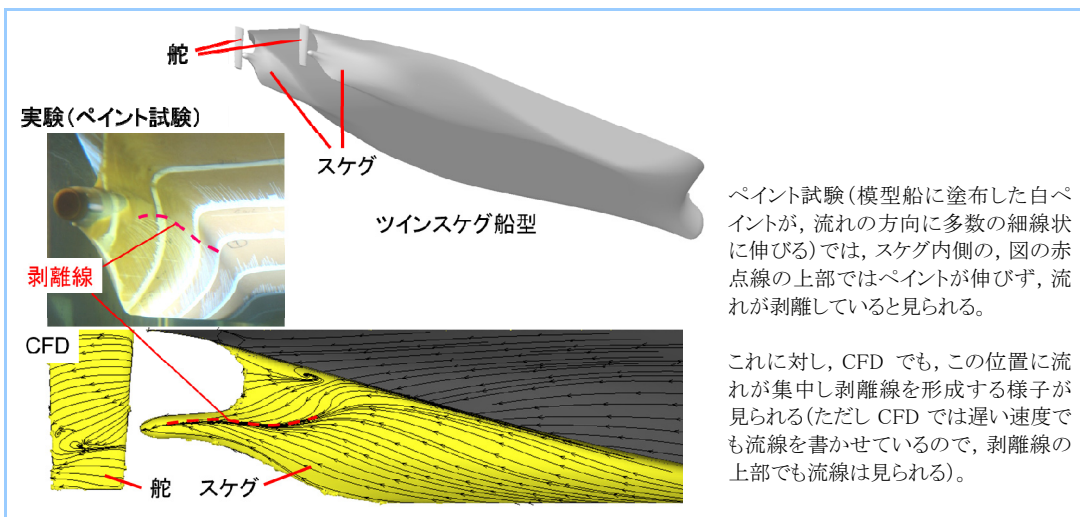


図8 ツインスケグ船型とそのスケグ内側の流れ

さらに、**図9**に左舷側プロペラ面における流場の比較を示す。スケグ内側に強い上昇流が確認できるとともに、下方で外から内に向かう流れが生じており、これによってスケグ下端のウェークが内側に流れている。これらの特徴的な流れの傾向を CFD でもとらえられている。このように、ツインスケグのような複雑な船尾形状に対して、本 CFD で、効率的に、詳細な流場状況を評価でき、これらの流場情報を参考に船型改良が実施される。

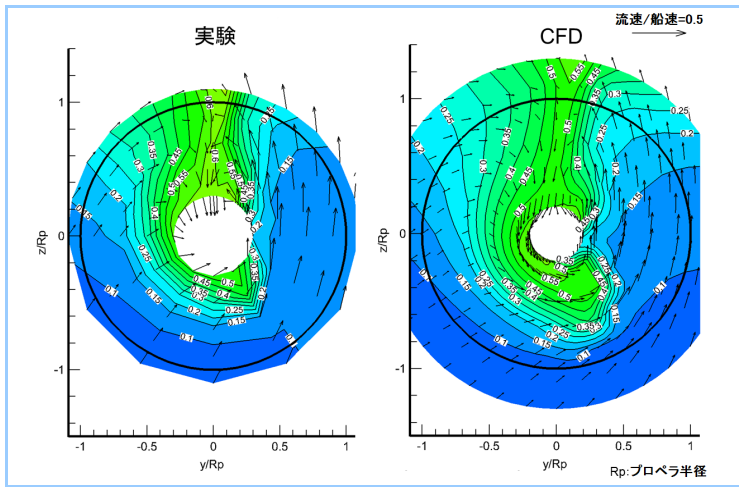


図9 ツインスケグ船型のプロペラ面流入流場(左プロペラ)
 コンターは青色に近いほど船体に対する相対流速が速いことを示す。スケグ内側で上昇流が強くなっている。また、下方に見られる外から内に向かう流れによって、スケグ後方の速度の遅い領域が内側に流れている。これらの状況を CFD でもとらえられている。

3.3 シャフトブラケット後方のプロペラ面流場の評価

図 10 に、シャフトブラケット付き船型の圧力分布と、同シャフトブラケット後方のプロペラ面流場を示す。同面内の流場には、2本のブラケットのウェークの間にシャフト自身のウェークが見られ、計3つのウェークが存在しているが、このような流場の特性が計算でもとらえられている。

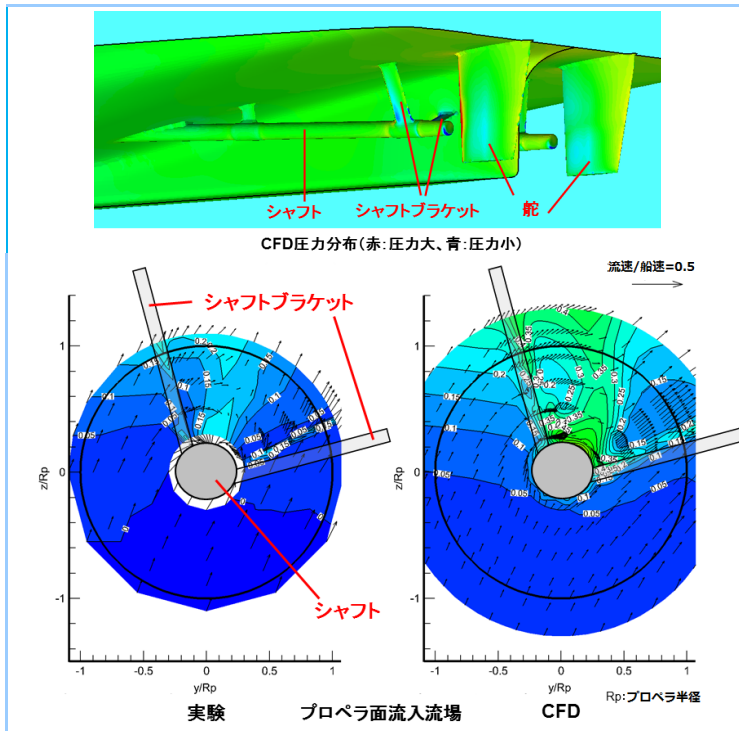


図 10 シャフトブラケット付き船型の圧力分布とプロペラ面流入流場(左プロペラ)

プロペラ面流入流場のベクトルに見られる、斜め上・内向きの流れにより、シャフト自身と2本のシャフトブラケットの、それぞれの下流で、計3つの、相対速度の遅い領域が生じる状況を、CFD でもとらえられている。

4. まとめ

当社では、最新の CFD 技術の活用、すなわち、格子数数百万～1千万レベルの大規模な非構造格子（ヘキサ格子）、ロバストな自由表面解析と並列計算機による高速演算が可能な CFD 技術の活用で、省エネ船型の開発に重要となる、船尾付近の複雑な船体形状あるいは付加物形状がその性能や流場に与える影響をより忠実に評価可能な実用的 CFD 手法を構築した。本手法を、これまでは評価が難しかった船尾波高の評価、ツインステグ船型の流場の評価、シャフトブラケット後方のプロペラ面流場の評価等に活用し、流場情報をもとに改良案を抽出することで、省エネ性能の向上に結び付けている。今後は実海域性能にも注目し、スケール影響や、波浪中抵抗などを考慮した設計手法の確立を進めていく。

参考文献

- (1) 高田憲尚ほか、自航状態にある舵付き実用船型周りの造波流場計算、日本造船学会論文集 第 192 号 (2002)p.63